干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

呼和浩特市生境质量对城市用地扩展的时空响应

冯琰玮，甄江红，马晨阳
（内蒙古师范大学地理科学学院，内蒙古 呼和浩特 010022）

摘 要：以呼和浩特市为研究区，采用梯度分析法，结合InVEST模型，在评价研究区近27 a城市用地扩展及生境质量演变的基础上，运用双变量空间自相关剖析生境质量对城市用地扩展的时空响应。结果表明：(1) 研究时段内，城市扩展表现为核心区的低密度扩张及外围区的多点扩散，紧凑度不断下降，城市结构不稳定，扩展模式不尽合理。(2) 生境平均值从0.49下降到0.44，质量等级跌至较差水平。低等级生境主要呈圈层向南部、东南部扩散，与建设用地扩展方向基本一致。(3) 建设用地扩展强度与生境质量变化空间分布呈负相关关系，核心外围区的建设用地扩展始终为变化最强烈的地带，生境质量退化也最为剧烈。(4) 斑块密度不断上升，特别是建设用地斑块的增加使得城市景观格局愈发破碎。

关 键 词： 新型城镇化；生境质量；城市用地扩展；InVEST模型；呼和浩特市
文章编号： 1000－6060(2020)04－1014－09(1014～1022)

城市用地扩展是城市化最直观的表现[1]。快速城市化背景下的城市用地扩展对生态环境的负面效应不断加剧，自然环境基底遭到破坏[2]。土地资源是人类赖以生存的物质基础，是社会经济发展的基本保障。高强度的经济开发活动不断逼近区域安全底线，引发诸如土地污染[3]、水资源短缺[4]、景观斑块破碎[5]、生境质量退化[6]等一系列生态问题，区域敏感性不断加强，生态安全面临严峻挑战[7]。上述问题中，生境质量退化对城市人居环境的影响尤为显著，也是人地关系矛盾的症结所在。如何减缓城市用地扩展对生境质量的负面效应，成为地理学、生态学等学科领域关注的重点[8－9]。国内外对生境质量的评价研究主要包括：(1) 方法论概述与研究综述[10]。(2) 对单一物种或群落进行实地调查并结合相关指标的评价研究[11－12]。(3) 生境质量综合评价，其研究范式[13]为：生境质量＝0.25×生物丰度指数＋0.2×植被覆盖指数＋0.2×水网密度指数＋0.2×土地退化指数＋0.15×环境质量指数。(4) InVEST模型生境质量评价模块。对于小范围的城市生境质量评价，InVEST模型具备独特优势，这一研究方法在大量实证研究中得以验证[14－15]。然而，多数研究基于生态学角度对各区域生境整体进行分析，对长时间序列的生境质量演变及其空间分异研究仍需补充。

呼和浩特市位于中国北部边疆，作为内蒙古自治区首府及“呼包鄂”金三角的中心城市，加之地处生态环境脆弱的农牧交错地带，该区域人地关系复杂，生态环境敏感[16]。以呼和浩特市为研究区，对于探讨生态脆弱区的生境质量演变具有一定的代表性和典型性。之前有关学者针对研究区鸟类栖息生境做过相关调查研究，但有关呼和浩特市整体生境的评价研究还鲜见纸端。本文采用梯度分析法，结合InVEST模型，在对研究区近27 a城市用地扩展及生境质量演变进行评价的基础上，运用双变量空间自相关剖析生境质量对城市用地扩展的时空响应，以期为城市与生态环境协调发展提供合理依据，也为其他发展背景相似的城市研究提供参考。

收稿日期：2019－09－07； **修订日期**：2020－04－05
基金项目：国家自然科学基金项目(41761032；41261109)；内蒙古自然科学基金项目(2016MS0410)资助
作者简介：冯琰玮(1994－)，男，山西大同人，博士研究生，研究方向为城市地理与区域发展. E-mail：fengyanwei123@icloud.com
通讯作者：甄江红(1970－)，女，内蒙古包头人，教授，博士生导师，研究方向为城市地理与区域发展. E-mail：zhenjianghong@sina.com

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

呼和浩特市地处内蒙古自治区的中西部，其市区位于蒙古高原南部边缘地带的土默川平原东北部，北依阴山，南面黄河。其气候属典型中温带大陆性季风气候，年平均气温6.4 ℃，降水主要集中在夏季；全年主导风向为西北风，年平均风速为1.8 $m\cdot s^{-1}$。由于地处西北干旱区，水资源十分有限，地表径流少，2017年市区人均水资源占有量仅为465 $m^3\cdot a^{-1}$。本文以呼和浩特市区为研究区，总面积为2 083.68 km^2。其中，2017年建设用地总面积达到457.95 km^2（图1），约占研究区总面积的22%，土地利用的迅速变化不仅对局部生态环境造成破坏，还对生态系统造成胁迫效应，进而影响区域可持续发展。

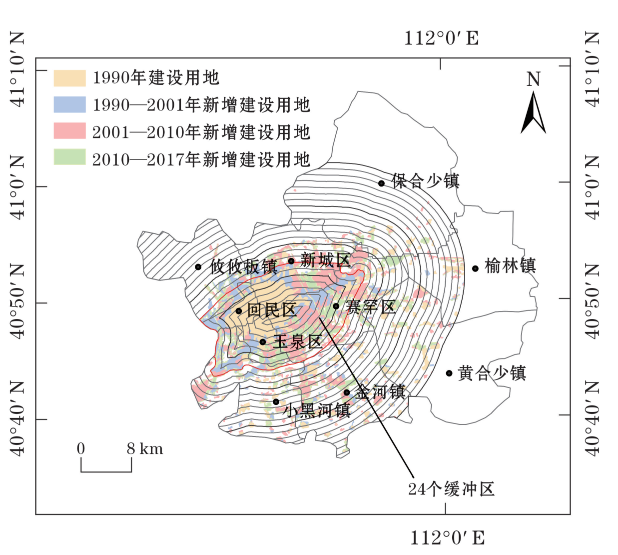


图1 研究区建设用地分布

Fig. 1 Distribution of construction land of study area

1.2 数据来源

采用1990、2001、2010、2017年4期Landsat遥感影像作为土地利用信息提取的基础数据（表1），影像数据均来源于地理空间数据云（http://www.gscloud.cn/）。采用人机交互目视解译法对土地利用类型分类，参照《土地利用现状分类》国家标准（GB/T21010－2017），分为耕地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地6种类型。经实地抽样调查检验解译精度，Kappa系数达到0.8以上，满足研究需求。高速公路、铁路、公路等交通路网信息来源于全国基础地理数据库2017版。其他数据主要运用ArcGIS、Fragstats、GeoDa等软件进行处理。

表1 遥感成像卫星信息

Tab. 1 Information of remote sensing satellite

卫星	影像类型	成像时间	轨道号
Landsat 5	TM	1990年8月22日	126 / 032
Landsat 7	ETM+	2001年8月12日	126 / 032
Landsat 5	TM	2010年8月29日	126 / 032
Landsat 8	OLI	2017年8月29日	126 / 032

2 研究方法

2.1 梯度分析法

梯度分析法是将研究对象按垂直或水平的空间特征进行分解，以达到对研究对象内部剖析的目的，此方法在生境、景观格局研究中更为多见，常见的梯度分析法包括地形梯度及圈层梯度[17－18]。鉴于研究区建设用地主要分布在山前冲击平原带，采用圈层梯度更为适宜[19]。城市建设用地一般通过对不透水地面的空间提取，计算城市各时期建设用地的面积及相关形态指数，从而刻画城市用地扩展的基本特征。为量化城市扩展对生境质量的影响，结合研究区实际，以1 km为缓冲区，2017年建成区边界线为圈层分析的初始边界，向内部、外部同时构建缓冲区，共建立了24条缓冲带。其中，2017年建成区边界线位于8号缓冲带。

2.2 城市用地扩展表征

结合梯度分析法，采用城市扩展核心度指数和城市扩展强度指数表征城市用地扩展的空间演变特征。其中，城市扩展核心度指数用以表征城市外部形态的紧凑程度，计算公式为：

$$BCI = \frac{N_c}{N_c + N_f} \tag{1}$$

式中：BCI为城市扩展核心度指数，值域在0～1之间，其值越大，城市形态就越紧凑；N_c、N_f分别是城市核心区（城市中心到建设用地密度≥50%的圈层区域）和城市外围区（城市核心区边界到建设用地密度＜50%的圈层区域）的缓冲区数量[20－21]。

城市扩展强度指数用以表征各时期城市建设用地扩展的强度，计算公式为：

$$UII = \frac{\Delta U_{ij}}{\Delta t_{ij} \times A_i} \tag{2}$$

式中：*UII*为城市扩展强度指数；ΔU_{ij}为从i到j时刻的建设用地面积的变化数量；Δt_{ij}为i到j的时间步长；A_i为i时刻建设用地的面积。

2.3 生境质量表征

在InVEST模型中，生境质量评价包括对生境退化度和生境适宜度的计算，生境退化度是威胁源对生境的干扰强度，生境适宜度为评价单元作为生境的适宜程度。将林地、草地、水体定义为生境，将建设用地、耕地、道路定义为威胁源[22]。生境退化度的计算方式为：

$$D_{xj}=\sum_{r=1}^{R}\sum_{y=1}^{Y_r}r_y\left(\frac{\delta_r}{\sum_{r=1}^{R}\delta_r}\right)\left[1-\left(\frac{d_{xy}}{d_{r\max}}\right)\right]\lambda_x S_{jr} \tag{3}$$

式中：r_y、δ_r分别是威胁源R所在位置的干扰程度与权重；λ_x、S_{jr}分别是生境的抗干扰能力及敏感程度；Y_r是威胁源的栅格数量；d_{xy}、d_{rmax}分别是威胁源与生境的欧氏距离及最大干扰半径。计算研究区的生境质量，公式如下：

$$Q_{xj}=H_j\left[1-\left(\frac{D_{xj}^{Z}}{D_{xj}^{Z}+k^{z}}\right)\right] \tag{4}$$

式中：H_j为生境j的生境适宜度；K为半饱和常数；Z为归一化常量，一般取值为2.5。对各参数进行设置，运行模型得到研究区各时期生境质量的空间分布。

2.4 双变量空间自相关

采用双变量空间自相关分析建设用地扩展强度与生境质量变化的空间相关性，具体计算方式如下：

$$Mora'ns\ I=\frac{X_y^{a}-\bar{X}_y}{\sigma_y^2}\times\sum_{c=1}^{n}\omega_{ac}\times\frac{X_z^{b}-\bar{X}_z}{\sigma_z^2} \tag{5}$$

式中：X_y^a是空间单元a的属性值y；X_z^b是空间单元b的属性值z；σ_z^2是属性值y的方差；σ_z^2是属性值z的方差；ω_{ac}是空间权重矩阵；$\bar{X}_y$、$\bar{X}_z$是属性值y、z的均值。

2.5 城市用地扩展景观特征表征

为进一步说明城市用地扩展景观特征对生境的影响，选择斑块密度及香浓多样性来反映研究区建设用地景观特征变化[23]，具体计算方式如下：

$$PD=N_t/A_t \tag{6}$$

$$SHEI=\frac{-\sum_{i=1}^{m}P_i\ln(P_i)}{\ln(m)} \tag{7}$$

式中：*PD*为斑块密度；N_t为总斑块数；A_t为区域面积。*PD*值越大，景观破碎化程度越高，生境岛屿化就越严重。*SHDI*为香浓多样性，P_i为景观类型i所占景观面积比例，该指标反映景观异质性，其值越大，生境就越敏感。

3 结果分析

3.1 城市用地扩展演变特征

从建设用地总体扩展水平来看（表2），近27 a呼和浩特市城市轮廓不断拉大，研究区建设用地面积由1990年的115.45 km²增加到2017年的457.95 km²，增长了近3倍，*UII*值为10.98%。具体来看，1990—2001年建设用地面积由最初的115.45 km²扩展到238.98 km²，净增123.53 km²，*UII*值为9.7%；2001—2010年城市用地规模明显拉大，建设用地面积达到382.16 km²，净增143.18 km²，*UII*值为6.7%；2010—2017年扩展面积净增75.79 km²，建设用地面积达到457.95 km²，*UII*值为2.8%。

从*BCI*值的变化情况来看，紧凑度趋势不断下降。从各时段的变化趋势来看，1990—2001年紧凑度下降幅度最大，从0.58下降到0.46，说明城市空间主要采取以片状蔓延的扩展形式，这主要是由于城市周边经济开发区的大力建设所致。2010年，紧凑度下降到0.41，这是由于呼和浩特市提出了新型城市发展战略，引导城市向东南方向扩展，“呼包鄂”一体化发展战略的提出使这一趋势明显加剧；2017年，紧凑度下降到0.39，这是由于城市大力发展新区建设，城市外部形态愈发不紧凑，城市扩展方位经历了向东北—东南—东南扩展的发展历程，城市扩展模式不尽合理。

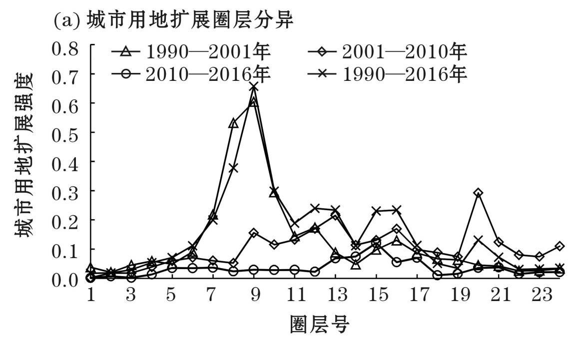
从建设用地扩展强度圈层变化分异来看（图2a），城市核心区边界由3号缓冲带推移至9号，城市外围区由9号缓冲带推移至19号。1990—2017年，建设用地扩展强度在7～11号、12～13号、15～16

表2 城市用地扩展各项指标变化趋势

Tab. 2 Trend of indicators in urban expansion

年份	城市核心区边界条带号	城市外围区边界条带号	建设用地面积	*UII*	*BCI*
1990年	3	9	115.45	—	0.58
2001年	6	12	238.98	0.097	0.46
2010年	8	15	382.16	0.067	0.41
2017年	9	19	457.95	0.028	0.39

号缓冲带出现谷峰,扩展强度水平均超过20%。其中,9号缓冲带附近扩展强度最大,扩展强度水平达到66%,此外,19~21号缓冲带附近扩展强度也有小范围提高。具体来看,1990年城市核心区范围较小,主要集中在1~3号缓冲带,扩张潜力巨大。1990—2001年的扩展强度水平最高,其扩展范围主要出现在7~10号缓冲带,城市核心区边界推移至6号缓冲带,城市外围区边界推移至12号缓冲带,其原因是赛罕区的大面积耕地转化为建设用地。2001—2010年,20号缓冲带扩展强度达到最大,其值为28%,城市核心区边界推移至8号缓冲带,城市外围区边界推移至15号缓冲带;2010—2017年,各缓冲带扩展水平有所放缓,城市形态趋于稳定,城市核心区边界推移至9号缓冲带,城市外围区边界推移至19号缓冲带,城市扩展表现为核心区的低密度扩张及外围区的多点扩散。



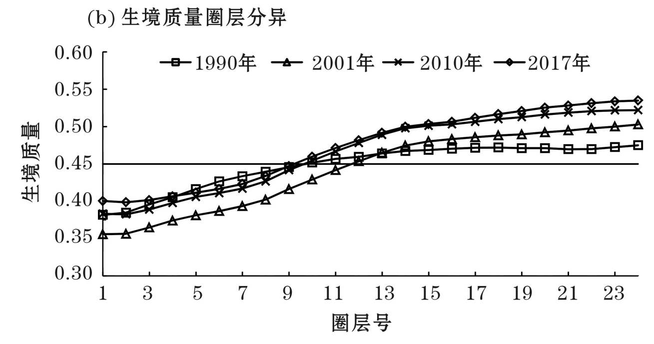


图2 城市用地扩展及生境质量圈层分异

Fig. 2 Different concentric rings of urban expansion and habitat quality

3.2 生境质量变化时空特征

计算得到各圈层生境质量具体数值,采用自然断裂法将生境质量分为低[0.32,0.38)、较低[0.38,0.45)、中[0.45,0.51)、较高[0.51,0.58]、高(0.58,0.64]5个等级,统计各生境质量等级所占比例,结果如图3所示。

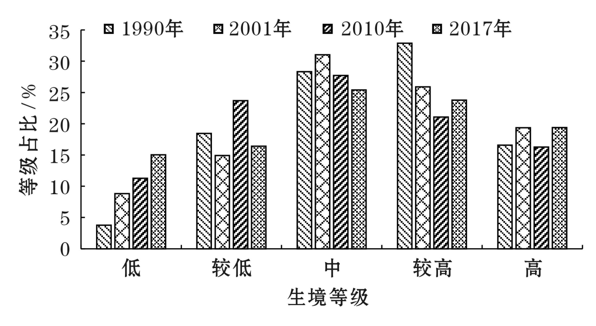


图3 生境质量等级所占比例

Fig. 3 Percentage in rank of habitat quality

结果显示,1990年较高以上生境等级占比为49.46%,2017年则下降至43.17%,下降幅度为6.29%;1990年较低以下生境等级占比为22.23%,特别是低等级生境占比仅为3.77%,而到2017年较低以下生境等级占比上升至31.43%,低等级生境占比达到15.02%,生境质量退化显著。具体来看,1990年生境质量平均值为0.49,生境质量等级居中。到2001年,较低以下生境等级出现上升势头,所占比例达到23.73%,其生境质量平均值下降到0.45,已触及较低与中生境等级的红线。从生境质量空间演变图可知(图4),低等级生境主要呈圈层向南部、东南部扩散,与建设用地扩展方向基本一致。其中,玉泉区、赛罕区的生境质量退化最为严重。到2010年,较低以下生境等级占比迅速攀升至34.96%,低等级生境范围进一步扩大,生境质量平均值下降到0.41。其中,小黑河镇、金河镇、黄合少镇、榆林镇生境退化显著,说明城市生境质量的下降已明显影响到城郊及城市周遭地区;而生境质量良好的地带主要分布在保合少镇,说明北部大青山南坡的生态修复工作颇有成效,作为呼和浩特市的生态屏障,其生态抗风险能力不断提高,生境适宜性有所增强。到2017年,生境质量平均值有所缓和,上升至0.44,但仍处于较低等级。其中,榆林镇、黄合少镇的生境质量有明显提高,蛮汗山在此分布,应充分发挥山脉的生态屏障优势,加强生态建设力度。

从生境质量圈层变化分异来看(图2b),较低生境等级主要位于1~7号缓冲带,中心城区生境质量最差。1990—2001年,较低生境等级被推移至11号缓冲带,高强度的经济建设开发活动使得生境质量不堪重负,这一时期各缓冲带生境质量均呈下降趋

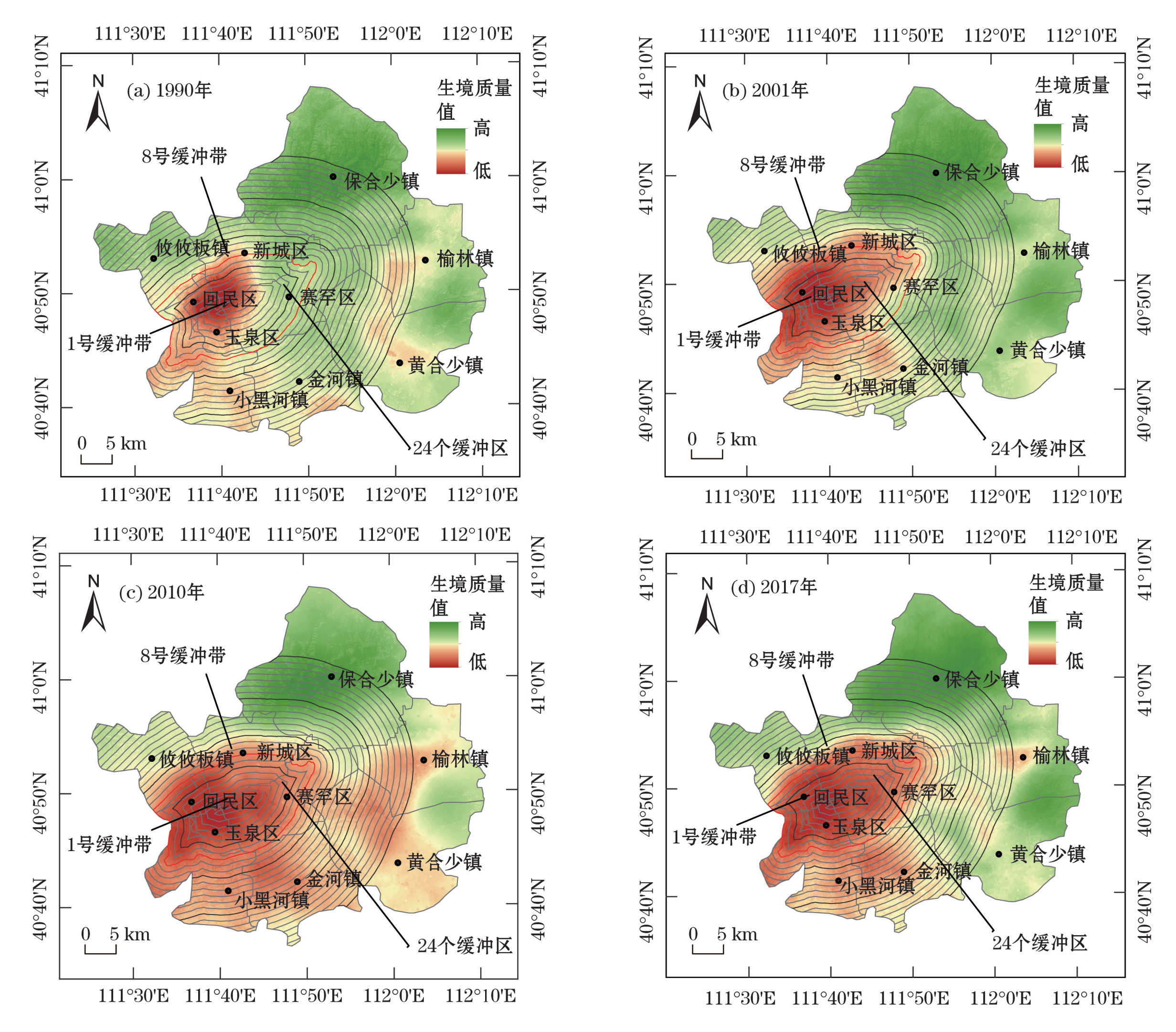


图4 研究区生境质量空间演变

Fig. 4 Spatial evolution of habitat quality of study area

势。近27 a来,5~9号缓冲带是生境质量下降最为显著的区域,随着城市建设用地的进一步扩张,如不加以措施调控,较低等级以下生境范围将进一步向外圈扩大。

3.3 生境质量对城市用地扩展的响应

应用GeoDa软件建立Rook空间权重矩阵,采用双变量空间自相关计算生境质量与城市用地扩展强度指数变化的Moran's *I*指数,结果通过P-*value*<0.01水平上的显著性检验。1990—2001年、2001—2010年、2010—2017年、1990—2017年的Moran's *I*值分别为-0.73、-0.51、-0.64、-0.68,说明城市建设用地的迅速扩张会进一步加剧生境质量退化的趋势。

根据城市用地扩展强度变化与生境质量变化双变量空间自相关LISA聚集图结果(图5),城市用地扩展与生境质量变化有明显的圈层对应关系,其集聚类型主要表现为低低集聚、高低集聚与低高聚集。具体来看,1990—2001年,4~6号缓冲带集聚类型为低低集聚,说明城市内部趋于稳定,生境质量变化不显著;7~8号缓冲带为高低集聚,说明城市核心区面积不断扩大,使得生境质量退化加剧;19~24号缓冲带为低高集聚,其他缓冲带空间关系不显著,说明城市外围区建设用地扩展强度小,生态环境质量有所提升。与前一时段相比较,2001—2010年,3号缓冲带出现高高集聚,说明这一时期研究区开始注重城市内部改造升级,城市公共绿地面积有所增加,生态环境质量得以提升。高低聚集则进一步向外推移,主要分布在9~13号缓冲带。2010—2017年,高高集聚消失,高低集聚则进一步向外推移,低高集聚缓冲带数量有所下降,说明城

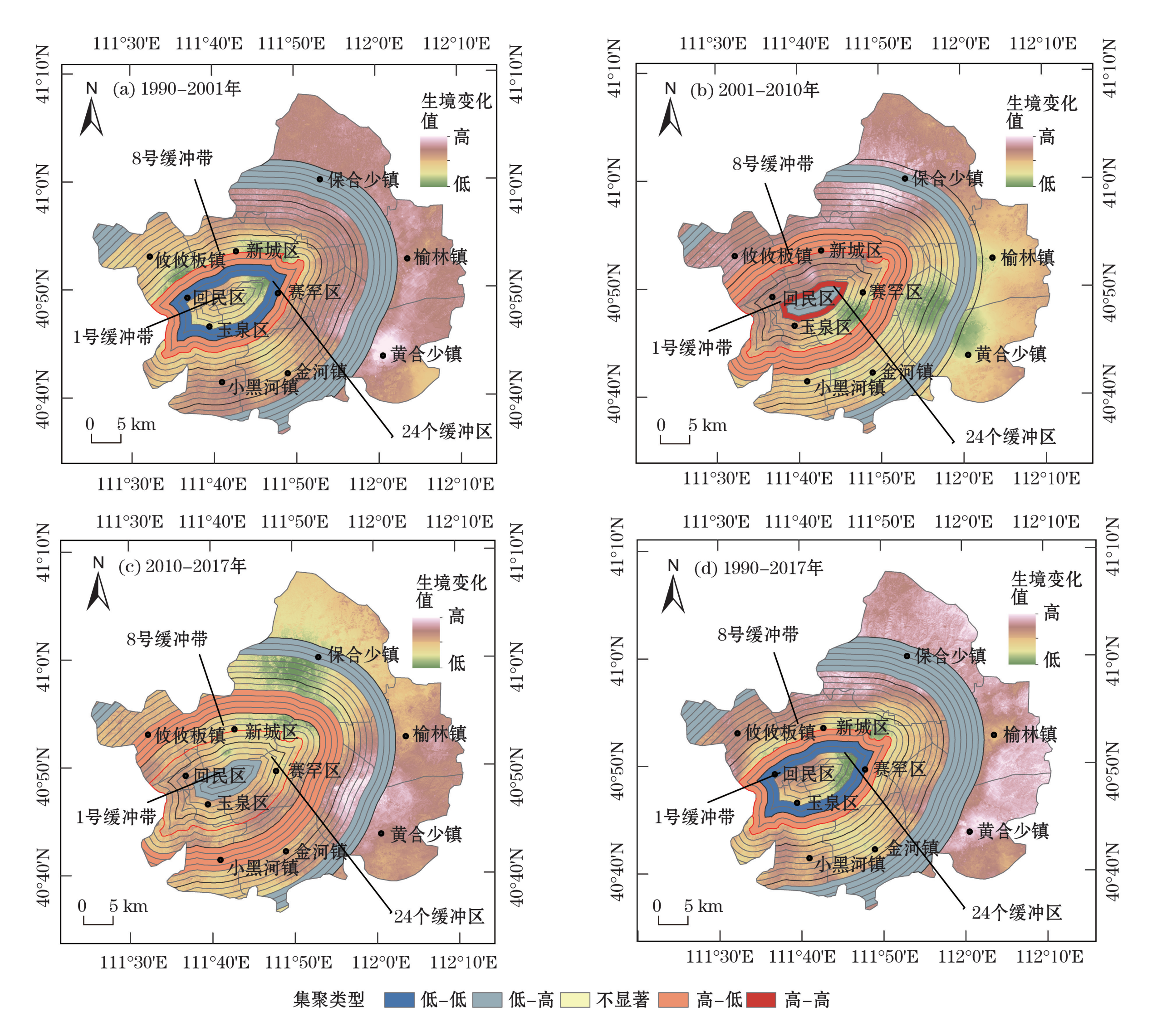


图5 研究区城市用地扩展强度与生境质量变化双变量空间自相关LISA聚集

Fig. 5 LISA aggregation between the change of urban expansion and habitat quality of study area

市边缘带生境质量受到威胁。总体而言，1990—2017年的集聚类型与1990—2001年趋同，核心外围区的建设用地扩展始终为变化最强烈的地带，生境质量退化也最为剧烈。城市用地扩展方向与生境质量变化方向基本一致。

3.4 建设用地景观特征对生境的影响

根据研究区建设用地斑块密度与香浓多样性计算结果，1990—2017年，斑块密度整体上升，从1990年的0.18上升到2017年的0.29，上升幅度达到61.11%，香浓多样性则从1.5上升至1.53，说明随着城市用地规模的扩大，斑块密度不断上升，特别是建设用地斑块增加使得城市景观破碎程度加剧，生境安全面临严重威胁。

根据斑块密度与香浓多样性变化圈层分异结果（图6），1990—2001年，斑块密度快速增加的缓冲带主要分布在1～7号，香浓多样性增加至高点则分布在7号缓冲带附近。2001—2010年，城市内部斑块开始联合，斑块分布趋于集中，斑块密度开始下降，但在7号缓冲带后又呈低速增长的趋势，该阶段香浓多样性变化趋势与斑块密度趋同。2010—2017年，斑块密度变化增长趋势推移至10号缓冲带，香浓多样性则被推移至12号缓冲带，说明城市轮廓的拉大使得核心外围区景观特征变化剧烈。整体来看，斑块密度在1～5号呈下降趋势，5号缓冲带之后均呈增加趋势；香浓多样性在1～7号及21～23号缓冲带呈下降趋势，7～21号缓冲带则呈上升趋势。斑块破碎化程度在核心外围区（7～9号缓冲带）骤然加剧，直到城市边缘带，其增长趋势才有所

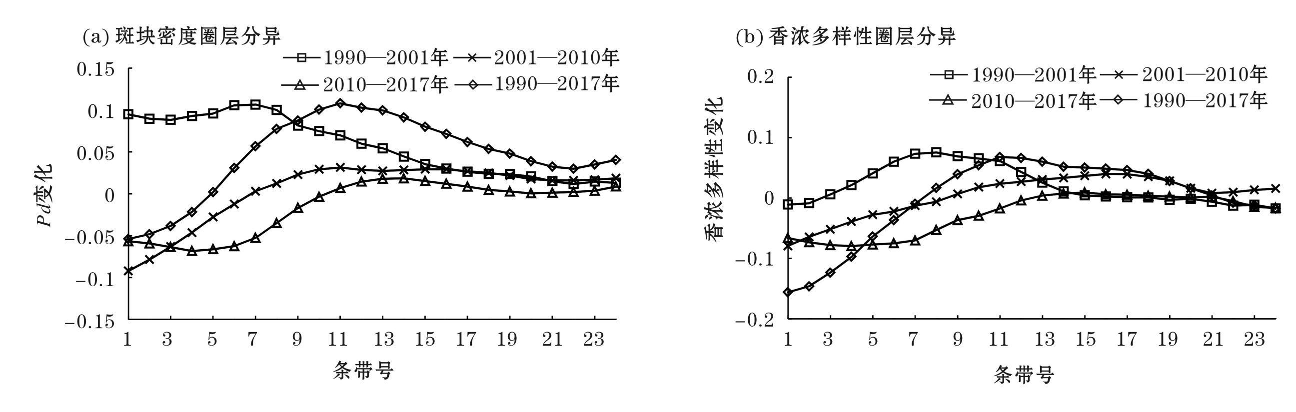


图6 研究区斑块密度与香浓多样性圈层分异

Fig. 6 Different concentric rings of PD and SHEI of study area

缓和,这也说明斑块破碎化与不均匀分布会加剧生境退化的程度。

4 结 论

本文采用梯度分析法,结合InVEST模型,在对研究区近27 a城市用地扩展及生境质量演变进行评价的基础上,运用双变量空间自相关剖析生境质量对城市用地扩展的时空响应,其结论如下:

(1) 研究区城市轮廓不断拉大,扩展强度指数处于较高水平,城市用地主要以外延式扩展为主。紧凑度不断下降,城市结构不稳定,扩展模式不尽合理。

(2) 研究区生境质量等级跌至较差水平,生境质量退化显著。生境质量经历了先迅速下降,后缓慢回升的阶段。从生境质量空间演变来看,低等级生境主要呈圈层向南部、东南部扩散,与建设用地扩展方向基本一致。

(3) 研究区建设用地扩展强度与生境质量变化空间分布呈空间负相关关系,城市建设用地的迅速扩张会进一步加剧生境质量退化的趋势。整体来看,核心外围区的建设用地扩展始终为变化最强烈的地带,生境质量退化也最为剧烈。

(4) 研究区斑块密度整体呈不断上升趋势,特别是建设用地斑块增加使得城市景观破碎程度加剧。斑块破碎化程度在核心外围区骤然加剧,直到城市边缘带,其增长趋势才有所缓和,斑块破碎化与不均匀分布会加剧生境退化的程度。

5 讨 论

土地城市化是城市化进程的一个重要方面,然而随着城市用地扩展,各类生态问题开始显现。研究区作为全国重要的生态屏障区,推动区域可持续发展尤为重要。参照研究区远景规划,建设用地需求仍处于较高水平。调整区域土地利用结构、提高土地利用效率势在必行。本文采用梯度分析法,结合InVEST模型,对研究区城市用地扩展及生境质量演变进行评价,运用双变量空间自相关剖析生境质量对城市用地扩展的时空响应,结果也验证了城市用地的快速扩张会促使区域生境质量退化的实际。本文的生境威胁源主要针对建设用地进行甄选,对其他威胁源(自然灾害、环境污染等方面)未纳入考虑,对威胁源数据的进一步丰富会使得模型运行结果更加合理,从而更好为城市与生态环境协调发展提供合理依据。

参考文献(References)

[1] 方创琳,鲍超,黄金川,等. 中国城镇化发展的地理学贡献与责任使命[J]. 地理科学,2018,38(3):321－331.[FANG Chuanglin, BAO Chao, HUANG Jinchuan, et al. Contribution, responsibility and mission of geography on China's urbanization development[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(3): 321－331.]

[2] 冯琰玮. 基于生态安全格局的城市增长边界划定研究[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2019. [FENG Yanwei. Urban growth boundary delineation method based on ecological security pattern: A case study of Hohhot City, Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2019.]

[3] 王金亮,谢德体,邵景安,等. 基于最小累积阻力模型的三峡库区耕地面源污染源-汇风险识别[J]. 农业工程学报,2016,32(16):206－215. [WANG Jinliang, XIE Deti, SHAO Jing'an, et al. Identification of source-sink risk pattern of agricultural non-point source pollution in cultivated land in Three Gorge Reservoir Area based on accumulative minimum resistance model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engi-

neering,2016,32(16):206－215.]

[4] 王红瑞,洪思扬,秦道清. 干旱与水资源短缺相关问题探讨[J]. 水资源保护,2017,33(5):1－4,24. [WANG Hongrui, HONG Siyang, QIN Daoqing. Discussion on related issues of drought and water shortage[J]. Water Resource Protection, 2017,33(5):1－4,24.]

[5] 谭术魁,韩思雨,周敏. 土地城市化背景下武汉市资源环境承载力仿真研究[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(11):1824－1830. [TAN Shukui, HAN Siyu, ZHOU Min. Simulation study on resources and environment carrying capacity in Wuhan City under the background of land urbanization[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(11): 1824－1830.]

[6] PENG J, PAN Y, LIU Y, et al. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape[J]. Habitat International, 2008, 71: 110－124.

[7] 闫虎,王玉杰,张会兰. 新疆巴音郭楞蒙古自治州生态敏感性分析[J]. 干旱区地理,2015,38(6):1226－1233. [YAN Hu, WANG Yujie, ZHANG Huilan. Ecological sensitivity of Bayingolin Mongolian autonomous prefecture of Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(6): 1226－1233.]

[8] 张衔春,马学广,单卓然,等. 精明增长政策下美国城市多中心治理研究[J]. 地理科学,2017,37(5):672－681. [ZHANG Xianchun, MA Xueguang, SHAN Zhuoran, et al. Poly-centric governance of urban space in America under smart growth policy[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(5): 672－681.]

[9] 张衔春,李长风. 基于国内外比较视角下城市蔓延概念与动力机制研究述评[J]. 现代城市研究,2013,28(10):29－35. [ZHANG Xianchun, LI Changfeng. Review on urban sprawl's connotation and dynamic mechanism based on domestic and international comparison[J]. Modern Urban Research, 2013, 28(10): 29－35.]

[10] 武晶,刘志民. 生境破碎化对生物多样性的影响研究综述[J]. 生态学杂志,2014,33(7):1946－1952. [WU Jing, LIU Zhimin. Effect of habitat fragmentation on biodiversity: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(7): 1946－1952.]

[11] 童笑笑,陈春娣,吴胜军,等. 三峡库区澎溪河消落带植物群落分布格局及生境影响[J]. 生态学报,2018,38(2):571－580. [TONG Xiaoxiao, CHEN Chundi, WU Shengjun, et al. Spatial distribution pattern of plant community and habitat impact analysis of the drawdown zone of Pengxi River in the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2): 571－580.]

[12] 甄江红,王永秀,成舜,等. 濒危植物四合木生境景观动态及其驱动因子分析[J]. 地理科学进展,2008,27(6):41－48. [ZHEN Jianghong, WANG Yongxiu, CHENG Shun, et al. Landscape dynamics and driving factors of endangered plant Tetraene mongolica's Habitats[J]. Progress in Geography, 2008, 27(6): 41－48.]

[13] 甄江红,王亚丰,田圆圆,等. 城市空间扩展的生态环境效应研究——以内蒙古呼和浩特市为例[J]. 地理研究,2019,38(5):1080－1091. [ZHEN Jianghong, WANG Yafeng, TIAN Yuanyuan, et al. Study on ecological environment effects of urban spatial expansion: Taking Inner Mongolia Hohhot City as an example[J]. Geographical Research, 2019, 38(5): 1080－1091.]

[14] 褚琳,张欣然,王天巍,等. 基于CA-Markov和InVEST模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测[J]. 应用生态学报,2018,29(12):4106－4118. [CHU Lin, ZHANG Xinran, WANG Tianwei, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of urban landscape pattern and habitat quality based on CA-Markov and InVEST model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(12): 4106－4118.]

[15] SAURA S, TORNE J. Conefor sensinode 2.2: A software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity[J]. Environmental Modelling &Software, 2009, 24(1): 135－139.

[16] 冯琰玮,甄江红,峰一,等. 干旱区城市增长边界划定方法与实证——以内蒙古呼和浩特市为例[J]. 经济地理,2019,39(3):76－83. [FENG Yanwei, ZHEN Jianghong, FENG Yi, et al. Method and demonstration of urban growth boundary delimitation in arid regions: A case study of Hohhot City, Inner Mongolia[J]. Economic Geography, 2019, 39(3): 76－83.]

[17] 岳文泽,徐建华,谈文琦,等. 城市景观多样性的空间尺度分析:以上海市外环线以内区域为例[J].生态学报,2005,25(1):122－128. [YUE Wenze, XU Jianhua, TAN Wenqi, et al. Spatial scale analysis of the diversities of urban landscape: A case study within the external circle highway of Shanghai City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(1): 122－128.]

[18] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(1): 4－11.

[19] 焦利民,张欣. 基于圈层建设用地密度分析的中国主要城市扩张的时空特征[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(10):1721－1728. [JIAO Liming, ZHANG Xin. Characterizing urban expansion of main metropolises in China based on built-up densities in concentric rings[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(10): 1721－1728.]

[20] SCHINEIDER A, WOODCOAK E. Compact, dispersed, fragmented, extensive? A comparison of urban growth in twenty live global cities using remotely sensed data, pattern metrics and census information[J]. Urban Studies, 2008, 45(3): 659－692.

[21] ANGEL S, PARENT J, DANIEL I, et al. The persistent decline of urban densities global and historical evidence of sprawl[R]. Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy, 2010.

[22] 戴云哲,李江风,杨建新. 长沙都市区生境质量对城市扩张的时空响应[J]. 地理科学进展,2018,37(10):1340－1351. [DAI Yunzhe, LI Jiangfeng, YANG Jianxin. Spatiotemporal responses of habitat quality to urban sprawl in the Changsha metropolitan area[J]. Progress in Geography, 2018, 37(10): 1340－1351.]

[23] 焦利民,肖丰涛,许刚,等. 武汉都市区绿地破碎化格局对城市扩张的时空响应[J]. 资源科学,2015,37(8):1650－1660. [JIAO Liming, XIAO Fengtao, XU Gang, et al. Spatial-temporal response of green land fragmentation patterns to urban expansion in Wuhan metropolitan area[J]. Resources Science, 2015, 37(8): 1650－1660.]

Spatiotemporal response of habitat quality to urban expansion in Hohhot City

FENG Yan-wei, ZHEN Jiang-hong, MA Chen-yang

(*College of Geography Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot* 010022, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: This paper evaluated the evolution of urban expansion and habitat quality in the Hohhot City, Inner Mongolia, China from 1990 to 2017 using gradient analysis and an InVEST model. A bivariate spatial auto-correlation was employed to ascertain the impact of urban expansion on habitat quality. The results showed that urban expansion during the period was characterized by low-density expansion in core areas and multi-point diffusion in periphery areas. The urban areas became less compact and stable, exhibiting uneven development. Secondly, the average habitat value decreased from 0.49 to 0.44, and the quality dropped to a worse level. Low-grade habitats primarily diffused to the south and southeast in a circular layer, which is consistent with the direction of construction expansion. Thirdly, there was a negative spatial correlation between the change in urban expansion and habitat quality. This is because urban expansion in the core-periphery areas remains the most intense changing zones where habitat quality degradation happen. In addition, there is a rising trend in the density of patches and an increasing use of patches during construction, which have aggravated the fragmented urban landscape.

Key words: new urbanization; habitat quality; urban expansion; InVEST model; Hohhot City